

Skladištenje vodika u podzemnim poroznim geološkim formacijama u funkciji pohrane viška električne energije generiranog putem OIE

Hydrogen underground storage as a solution for storing surplus power from variable renewable energy sources

Tomislav Kovačić
Podzemno skladište plina d.o.o.
tomislav.kovacic@psp.hr

doc.dr.sc. Darko Pavlović
Plinacro d.o.o.
darko.pavlovic@plinacro.hr

Pavo Rajič
Podzemno skladište plina d.o.o.
pavo.rajic@psp.hr

dr.sc. Ivan Zelenika
Podzemno skladište plina d.o.o.
ivan.zelenika@psp.hr



Ključne riječi: obnovljivi izvori energije, skladištenje vodika, podzemne geološke porozne formacije

Key words: renewable energy sources, hydrogen production, underground hydrogen storage, underground porous geological formations

Sažetak

Obnovljivi izvori energije, kao jedan od izvora električne energije, čine sve bitniju komponentu u ukupnom energetsom miksu potrošnje energije u Europskoj Uniji. Iako električna energija iz OIE kao energent predstavlja rješenje problema u smislu generiranja prekomjerne količine stakleničkih plinova, njezino skladištenje u velikim količinama još uvijek predstavlja tehnološki izazov. U članku je razmatrana pretvorba takozvanog viška električne energije generirane obnovljivim izvorima energije elektrolizom vode

u kemijsku energiju te njezino podzemno skladištenje ili eventualna trenutna potrošnja. Naime, jedno od mogućih rješenja u funkciji transformacije i dekarbonizacije energetskega sektora je i projekt pretvorbe i skladištenja energije vjetra i sunca, odnosno podzemno skladištenje kemijske energije, vodika. Pri tome se podzemno skladištenje kemijske energije (vodika) poistovjećuje se sa skladištenjem električne energije, uz prednosti i tehničko-tehnološke mogućnosti koje omogućava podzemno skladištenje kemijskog oblika energije. U osnovnom ciklusu dobivanja vodika i njegovog skladištenja, podzemno skladištenje vodika (PSV) unutar geoloških formacija je ključan element kojim se ostvaruje uskladištenje velike količine energije na teoretski neograničen vremenski period. Energiju pohranjenu u tom obliku moguće je primjerice plasirati u plinsku mrežu te koristiti kao gorivo za industrijske plinske turbine i ostale plinske potrošače. U članku je dan osvrt na mogućnosti primjene navedene

tehnologije na području Republike Hrvatske korištenjem manjeg tipskog podzemnog skladišta plina (PSP). Prikazan je tehničko-tehnološki proces dobivanja i podzemnog skladištenja vodika: od generiranja električne energije putem obnovljivih izvora ili ostalih industrijskih procesa koji generiraju otpadnu energiju, dobivanje vodika te njegovo komprimiranje, transport i skladištenje u podzemnim geološkim formacijama. Autori će u ovom radu iznijeti i stanje regulative država EU koja je temelj prethodno navedenim aktivnostima, regulatorno stanje u Republici Hrvatskoj te potrebne promjene istog. U tom kontekstu, autori zaključuju da vodik nedvojbeno nudi nenadmašnu svestranost kao nositelja energije, pri čemu će upravo proizvodnja u potrebnim količinama predstavljati veliki izazov, te da u tom kontekstu treba vodik promatrati dakle kao nositelja energije, (primjerice, u nekim zemljama kao što su Belgija, Nizozemska, Njemačka i Francuske, već su u „pogonu“, odnosno koriste se vodikovi plinovodi duljine čak i preko 1000 km), a ne izvor energije pri čemu ostaje pitanje - kako proizvesti dovoljno vodika za vodikovo gospodarstvo?



Abstract

Renewable energy, as one of the sources of electricity, is playing an increasingly important role in the overall energy mix of the European Union. Although electricity as a „clean“ energy source represents a solution to the problem of high greenhouse gas emissions due to the consumption of fossil fuels, its large-scale storage is still a technological challenge. The transformation of the so-called fluctuating renewable electricity using electrolysis of water into chemical energy and its storage or possibly immediate use is discussed in this paper. The storage of chemical energy in the form of hydrogen is equivalent to storing electricity, with the advantages and technological possibilities that the storage of the chemical form of energy provides. In the technological process of hydrogen generation, storage and consumption, underground hydrogen storage (UHS) is an essential part that enables the storage of a large amounts of energy for a theoretically unlimited periods of time. The energy stored in this form can be used for different objectives, for example; turn gas-fired turbines, when convenient produced in the gas network and sold on a market or just to meet occasional high demands for fuel for a variety of industrial gas consumers. Possibilities of applying the mentioned technology in the Republic of Croatia,

using small conventional underground gas storage (UGS), are also described. A technological overview of hydrogen generation, transport and storage in the geological formations is given and in addition, a rough estimation of the total amount of stored energy. In this paper, the authors will also present an overview of the regulation of EU countries that is the legal foundation of the mentioned above activities, as well as the regulatory framework in the Republic of Croatia, and its necessary changes. In this context, the authors conclude that hydrogen undoubtedly offers unprecedented versatility as an energy carrier, with production in the required quantities posing a major challenge, and that in this context, hydrogen should therefore be viewed as an energy carrier, not a energy source, so the question remains - how to produce enough Hydrogen for a hydrogen economy?

1. Uvod

Dugi niz godina skladištenje energije nije se smatralo prioritetom energetskeg sustava, dijelom zbog toga što aktualna tehnologija nije bila ekonomski isplativa, te dijelom zbog toga što je skladištenje energije bilo ekonomski manje vrednovano u energetskim sustavima koji su bili dominantni po upotrebi fosilnih goriva. Nastavno na navedeno, odlučna opredijeljenost javne politike prema de-karbonizaciji sve više stimulira razvoj tehnologije usko vezan za obnovljive izvore energije (OIE). Iako se udio električne pridobiven putem tzv. stohastičkih obnovljivih izvora energije (vjetroelektrane i fotonaponski sustavi) iz godine u godinu u zemljama EU povećava, još uvijek ne prelazi granicu od 20% u ukupnom udjelu proizvedene energije.⁽²²⁾ Veća penetracija u globalnom udjelu je moguća uz rješavanje mnogobrojnih tehnički izazova koji su posljedica njihovog intermitentnog rada. U ovom kontekstu treba napomenuti da je proizvodnja električne energije iz OIE uvelike ovisna o vremenskim prilikama te u tom smislu gubi mogućnost zadržavanja kontinuirane proizvodnje što sa tehničkog aspekta vođenja i upravljanja elektro-energetskom mrežom predstavlja izazov i problem koji može dovesti do nepotrebnih energetskih gubitaka te nesrazmjera između ponude i potražnje električne energije. Primjerice, za planiranje proizvodnje električne energije iz postrojenja koja koriste intermitentne obnovljive izvore energije, kao što su vjetroelektrane, sunčane elektrane i male hidroelektrane, nužni su sofisticirani softverski alati. S druge strane za planiranje proizvodnje električne energije iz

postrojenja koja koriste upravljive obnovljive izvore energije, kao što su elektrane na biomasu, elektrane na bioplin, geotermalne elektrane te visokoučinkovite kogeneracije, za kvalitetno planiranje proizvodnje je nužno dobivanje planova proizvodnje od proizvođača za navedene tipove postrojenja.⁽¹¹⁾ U svrhu povećanja sigurnosti dobave energije, postizanju veće učinkovitosti mrežnih energetske sustava u uvjetima povećanja penetracije i distribucije obnovljivih izvora energije, potrebno je povećati sposobnost skladištenja energije, kako na strani energetske postrojenja, tako i na strani potrošača⁽¹⁰⁾.

Izgradnja elektroenergetskog sustava koji će moći prihvatiti veće količine električne energije proizvedene intermitentnim (stohastičkim) izvorima, kao što su vjetar i sunčevo zračenje je realno i moguće te treba biti primjenjivano u praksi. Uvažavajući Europski cilj zastupljenosti OIE u ukupnoj proizvodnji energije od 85% do kraja 2050 s time da minimalno 65% od navedene količine pripada upravo stohastičkim izvorima energije kao što su vjetar i sunce, skladištenje energije dobivene iz OIE zbog tehnoloških specifičnosti vezanih za njezino pridobivanje ključno je za ostvarivanje tranzicije na energetske sustav koji se zasniva na niskom udjelu ugljika u proizvodnji i iskorištavanju energije.

Kao jedno od zanimljivih tehnoloških rješenja nameće se skladištenje viška energije proizvedene iz OIE u obliku kemijske energije vodika. Dosadašnja ciljana istraživanja ukazuju na činjenicu da će vodik igrati ključnu ulogu u lancu distribucije, opskrbe i skladištenja energije generirane iz OIE⁽¹⁷⁾. Višak električne energije pridobiven iz stohastičkih OIE koristi se u postupku elektrolize za razdvajanje molekula vode na vodik i kisik. Izdvojeni vodik nadalje komprimira se na ležišni tlak te pohranjuje u ležište za kasniju upotrebu. Osim podzemnog skladištenja vodika moguć je i njegov direktan transport u plinski sustav (primjerice europska vodikova mreža duga je 1.500 km i obuhvaća dio Njemačke, Francuske i zemalja Beneluksa) u odgovarajućem omjeru s prirodnim plinom, iskorištavanje na licu mjesta kao energenta za pogonsku potrošnju ili izdvajanje iz smjese plina te pretvorba iz kemijskog oblika energije u električnu energiju putem gorivih ćelija.

Sve naprednija tehnološka rješenja sustava elektrolize ključna su za pretvaranje viška električne energije iz OIE u vodik. To se može vidjeti i na listi aktualnih pilot projekata vezanih za proizvodnju vodika u zemljama EU, gdje od ukupno 33 aktualna projekta, gotovo polovica upotrebljava sustav elektrolize. Također, zemlje EU trenutno prednjače u razvoju i proizvodnji naprednih

sustava elektrolize, a trenutno na tržištu postoje i specifične verzije uređaja namijenjene upravo proizvodnji vodika iz viška energije generirane putem OIE. Njihova odlika je relativno malo vrijeme odziva i prilagodljivost varijabilnom načinu rada⁽⁸⁾.

Osvrti znanstvene zajednice involvirane u istraživanje vodika predviđaju da će vodik kao energetske nosač postići komercijalnu održivost u narednim godinama, što predstavlja dodatnu vrijednost u postizanju zadanih ciljeva definiranih pariškim sporazumom u smislu održivosti i neovisnosti energetske sustava⁽¹⁷⁾.

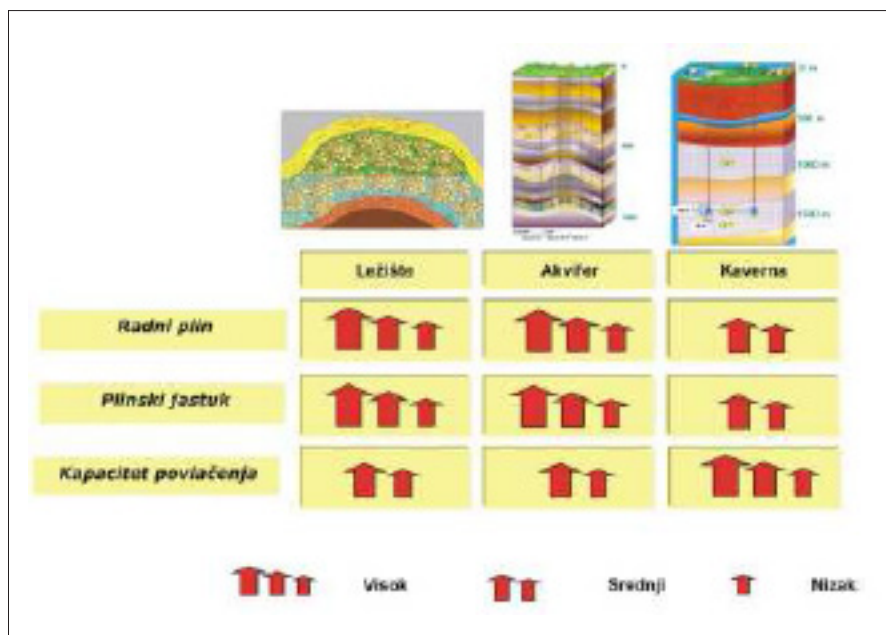
Možemo reći da vodik postaje ključni dio održive i sigurnije energetske budućnosti pri čemu autori posebno naglašavaju činjenicu da EU ima razvijen sustav za prijenos i distribuciju plina diljem kontinenta, ali sama veća primjena korištenja vodika u plinovodnoj mreži svoju ekonomsku opravdanost će imati jedino ako se to bude smatralo dugoročnom energetske opcijom (Gazprom je već patentirao i testira metodu proizvodnje vodika iz metana koji koristi adijabatsku pretvorbu: rezultirajuća smjesa metana i vodika zadovoljava vlastite potrebe tvrtke na kompresorskim stanicama).

2. Tehnologija proizvodnje vodika u funkciji skladištenja u podzemne porozne geološke formacije

Dosadašnja istraživanja provedenih studija^(7,21) ukazuju da se geološke formacije pogodne za skladištenje prirodnog plina mogu koristiti i za skladištenje ne-ugljkovodličnih plinova. Postoje tri osnovna tipa podzemnih skladišta plina obzirom na vrstu geološke formacije u kojima se može skladištiti plin, (Slika 1), to su:

- skladišta plina u iscrpljenim plinskim ili naftnim ležištima,
- skladišta plina u vodonosnicima,
- skladišta plina u solnim kavernama.

Skladištenje plina u **iscrpljenim plinskim i naftnim ležištima je najzastupljenije**. Iscrpljena ležišta predstavljaju geološke formacije iz kojih su već iscrpljene pridobive rezerve plina što znači da je podzemna formacija geološki sposobna zadržavati plin. Ukoliko se za skladištenje koriste ležišta koja su bila u proizvodnji moguće je u svrhu skladištenja plina iskoristi dio bušotinskog fonda te procesnog postrojenja što rezultira smanjenjem troškova izrade podzemnog skladišta plina. Iscrpljena ležišta su također ekonomski



Slika 1. Osnovni tipovi podzemnih skladišta plina i karakteristike.

isplativija iz razloga što su njihove geološke karakteristike već poznate.

Vodonosnici su šupljikave i propusne stijene u kojima je akumulirana uglavnom konatna voda, odnosno voda koja se u tim stijenama nalazi od vremena njihova postanka. U određenim slučajevima takva vodena ležišta moguće je koristiti za podzemno skladištenje prirodnog plina pri čemu vrijede isti kriteriji odabira kao i za iscrpljena plinska ili naftna ležišta. Zbog velikih ulaganja u plinski jastuk, cijena izgradnje skladišta u vodonosnicima je veća nego u iscrpljenim plinskim, pa i iscrpljenim naftnim ležištima. Pored toga, potrebno je i dodatno investirati u njihovo istraživanje, odnosno različitim, geološkim, geofizičkim i rudarskim radovima prikupiti potrebne informacije o ležištu koje kod iscrpljenih ležišta ugljikovodika uglavnom već postoje.

Solne kaverne (dome) predstavljaju sasvim drugi tip skladišta plina, budući da se plin u ovom slučaju ne skladišti unutar pora ležišne stijene, već u kavernama koje su određenim tehničkim postupcima otapanja i ispiranja napravljene unutar debelih naslaga soli. Prazan prostor odnosno kaverna unutar naslaga soli stvara se uz pomoć utisne bušotine koja ostvaruje kontakt sa formacijom soli na projektiranoj dubini te cirkulacijom velikog volumena vode naslage soli postupno se ispiru uz formiranje kaverne. Voda zasićena sa soli cirkulacijom se vraća na površinu i zbrinjava na adekvatno mjesto.

Svaki od navedenih tipova skladišta ima svoje prednosti i nedostatke, ali kod odabira i evaluacije formacije pogodne za skladištenje svi rizici moraju biti uzeti u obzir budući da se radi o vrlo velikim

početnim investicijama, a posebice oni koji se odnose na procjenu kapaciteta skladišta i sposobnost zadržavanja utisnutog plina u ležište bez mogućnosti njegove migracije odnosno gubitka.

Iako je skladištenje vodika (samog ili u smjesi s prirodnim plinom) u navedenim podzemnim skladištima plina najekonomičnije i nije do sad u praksi pokazalo značajnije negativne pokazatelje, zbog specifičnih karakteristika vodika (mala težina i veličine, velike mobilnosti, reaktivnost s mikroorganizmima ...) prije početka skladištenju potrebno je obaviti niz laboratorijskih i hidrodinamičkih ispitivanja da bi se utvrdila pogodnost lokacije za PSV.

Zbog velike energije vezivanja elektrona-protona u atomu vodika, vodik je kemijski inertan na tlaku i temperaturi konvencionalnih podzemnih skladišta plina, osim u slučajevima kada su ležištima prisutne bakterije. Biokemijskim analizama treba utvrditi prisutnost bakterija koje mogu uzrokovati kemijsku reakciju vodika s drugim spojevima te samim time smanjenje njegove koncentracije u skladištu (stvaranje metana, acetata, H_2S , FeO ...). Geokemijskim analizama treba provjeriti postoji li mogućnost iniciranja kemijskih procesa zbog prisutnosti vodika u ležištima (eventualno otapanje i taloženje karbonata zbog povećanja lužnatosti, ili neke druge kemijske reakcije vodika s ležišnom stijenom). Dosadašnja istraživanja pokazala su da u ležištima gdje su prisutni nepovoljni uvjeti za skladištenje vodika, najveći se dio vodika pretvara u vodu i metan, a samo manje količine otapaju se u ležišnoj vodi (zbog vrlo slabe topivosti vodika u vodi)⁽⁹⁾.

Zbog male viskoznosti, odnosno velike mobilnosti, vodika ili mješavine vodika i prirodnog plina tijekom

utiskivanja u vodonosnike ili u skladišta s jakim vodonapornim režimom može doći do prodora uskih brzorastućih fronti vodika u vodenu zonu (tzv. „fingering“) koje nepovoljno utječu na uniformno potiskivanje vode u skladištu i u konačnici trajno zarobljavanje određene količine vodika⁽⁹⁾.

Uz već navedenu malu topivost vodika u vodi mala je i vjerojatnost njegove difuzije kroz pokrovne stijene ili stijene strukturne zamke koja formira skladište⁽⁹⁾, jer kad su stijene vrlo male propusnosti zasićene vodom one predstavljaju praktično nepropusnu barijeru za vodik. Tijekom skladištenja vodika utvrđeno je da se maksimalno 2% vodika gubi zbog difuzije kroz pokrovne stijene i maksimalno 2% zbog otapanja u ležišnoj vodi⁽⁹⁾.

2.1. Tehnologija elektrolize vode i elektrolizatori

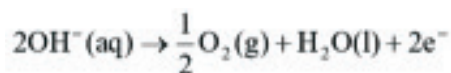
Proizvodnja vodika elektrolizom vode u odnosu na ostale načine proizvodnje vodika ima opravdanja ako je električna energija jeftina ili se dobiva iz obnovljivih izvora energije^(1,9). Najrašireniji način proizvodnje vodika je tzv. reforming metana pomoću vodene pare gdje se vodena para temperature 700-1000°C pri tlaku do 25 bar koristi za reakciju s metanom uz prisustvo katalizatora.

Elektroliza vode je elektrokemijski postupak kojim se voda (H₂O) razlaže na vodik (H₂) i kisik (O₂) uslijed djelovanja vanjskog izvora istosmjerne električne energije. Kemijske reakcije elektrolize koje se odvijaju na elektrodama mogu se prikazati sljedećim jednadžbama.

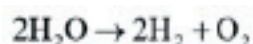
Na katodi se vrši redukcija i nastaje vodik (u plinovitom stanju):



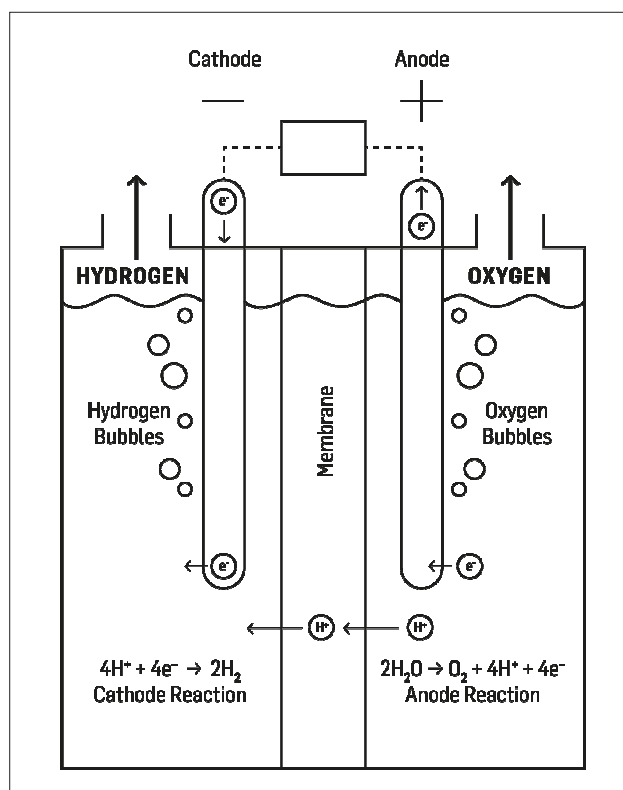
Na anodi se odvija oksidacija pri kojoj nastaje kisik (također kao plin):



Konačni izraz glasi:



Elektrolizator je elektrokemijski uređaj u kojemu se pomoću elektrolize vode proizvodi vodik i kisik u plinovitim fazama. Proces se naziva elektrokemijski jer se pomoću istosmjerne električne energije dobiva kemijska energija spremljena u vodik. Količina proizvodnje vodika ovisna je o broju članaka



Slika 2. Postrojenje za elektrolizu s krutim elektrolitom (PEM)
(17)

u elektrolizatoru. Elektrolizatori se dijele prema mediju koji se koristi u postupku elektrolize, a mogu se podijeliti na:

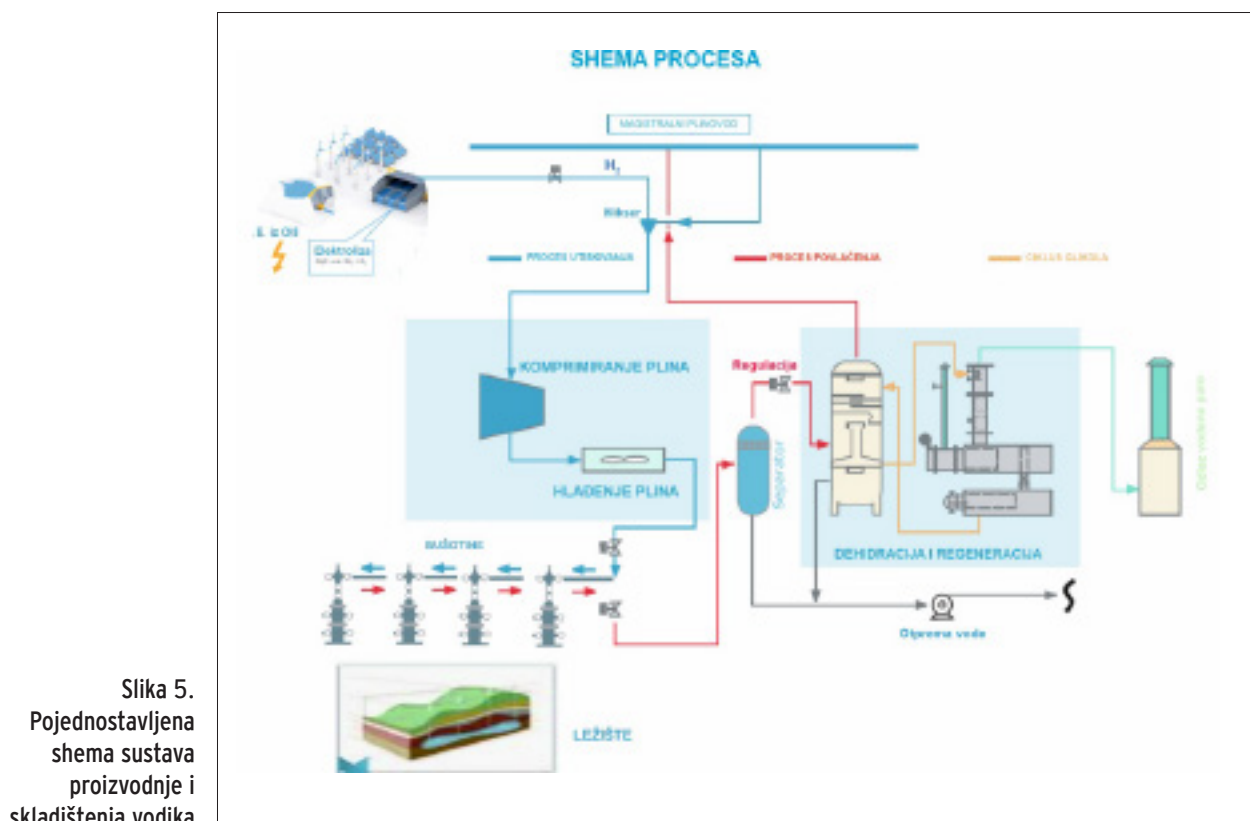
- Alkalne elektrolizatore
- PEM elektrolizatore (proton exchange membrane)
- Parne (visokotemperaturne) elektrolizatore

Alkalni elektrolizatori, u upotrebi su cijelo stoljeće, a novije generacije PEM elektrolizatora pružaju veću raspodjelu snage i učinkovitost. PEM elektrolizator koristi polimerni elektrolit koji može raditi i na temperaturama do 900°C (viša temperatura daje veću efikasnost). Također, PEM elektrolizatori vrlo dobro funkcioniraju s električnim sustavima baziranim na stohastičkim OIE energije.

Elektrolit može biti u tekućem ili krutom stanju. Proces elektrolize s krutim elektrolitom prikazan je Slikom 2.

Postrojenje za elektrolizu s krutim elektrolitom može raditi sa strujom visoke gustoće koja se može vremenski brzo mijenjati dok istosmjerni napon ćelije iznosi oko 2 V, (Slika 3).

Radna temperatura ćelije kreće se u rasponu 50-80°C. Postrojenje za elektrolizu s tekućim elektrolitom radi tako da se ioni hidroksida (OH⁻) prenose



preostale molekule kisika mogu se odstraniti katalitičkom reakcijom u de-oksikatoru. Proizvedeni plin suši se u sušaču napunjenom desikantom koji apsorbira vlagu. U sklopu postrojenja za elektrolizu potrebno je predvidjeti i sustav za kemijsku pripremu vode membranskom filtracijom ili ultra-filtracijom te ultraljubičastom sterilizacijom radi sprečavanja nastanka biološkog taloga na stjenkama membrana katalizatora. Prosječni zahtjev sustava za elektrolizu vode je otprilike 0,9-1 litra pročišćene vode po proizvedenom standardnom kubnom metru vodika.

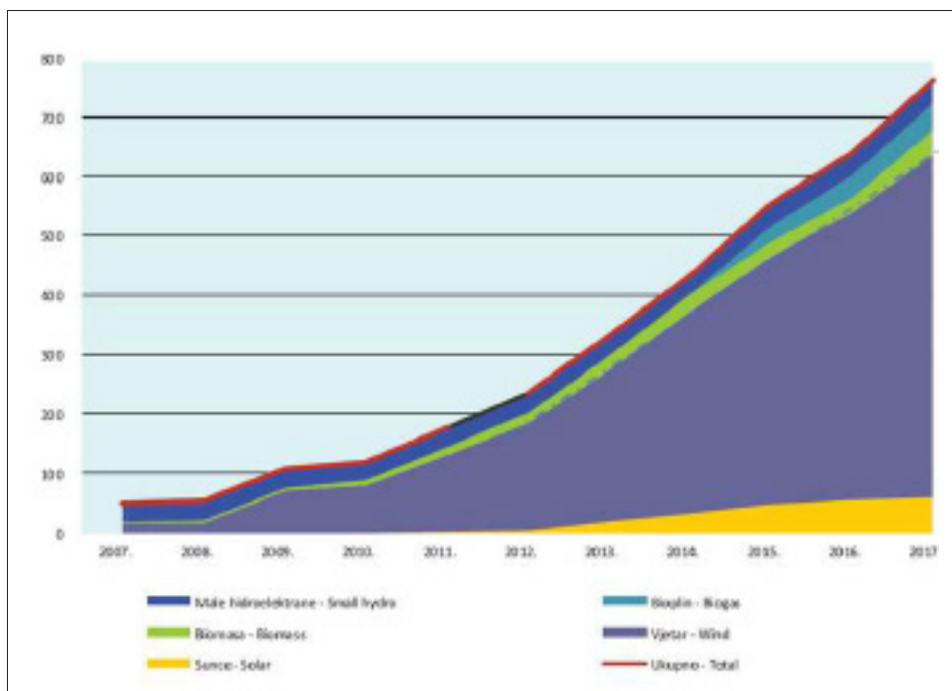
Izdvojeni vodik nakon hlađenja miješa se sa prirodnim plinom u određenom omjeru te mjeri prije ulaska u kompresorske jedinice. Nakon komprimiranja, transportira se do utisnih bušotina odnosno do ležišta. Količinu vodika u smjesi plina poželjno je mjeriti prije ulaska smjese plina u kompresorsku stanicu, te prilikom proizvodnje plina iz ležišta neposredno prije ulaska smjese plina u transportni sustav. Prilikom proizvodnje (povlačenje) plina zasićenog vodikom iz ležišta, isti je moguće direktno plasirati u plinski sustav ili nakon izdvajanja čistog vodika uz pomoć membranskog separatora pretvarati putem gorivih ćelija povratno u električnu energiju.

Slijedom navedenog, bitno je napomenuti da su provedena istraživanja^(21,7) dokazala kompatibilnost tehnološke infrastrukture (izgrađenih postrojenja) procesa skladištenja prirodnog plina sa procesom

skladištenja vodika (do određene vrijednosti parcijalnog tlaka plina u cjevovodima nadzemnog sustava) i to za utiskivanje čistog vodika. Dosadašnja istraživanja i praksa^(21,23) zaključuju da je tehnologija koja se koristi za komprimiranje i transport prirodnog plina podjednako za rad sa smjesom prirodnog plina i vodika (do 20% volumnog udjela vodika) i na visokim radnim tlakovima.

2.3. Izbor scenarija izdvajanja i skladištenja vodika utiskivanje u ležište, korištenjem energije obnovljivih izvora

Trenutno su subjekti za proizvodnju električne energije iz stohastički OIE obično samo djelomično kompenzirani u slučaju nemogućnosti isporuke električne energije u mrežu uslijed smanjene potražnje za električnom energijom ili trenutne pre-opterećenosti elektroenergetskog sustava. Budući pravno regulatorni okviri vezani za navedenu problematiku trebali bi biti još rigorozniji, uz primjenu mogućnosti kompenzacije isključivo u slučaju ne-postojanja druge alternative plasiranja električne energije iz OIE u mrežu⁽¹⁷⁾. Ukoliko se pretpostavi sustav za proizvodnju vodika priključen na mrežu u funkciji potrošača viška električne energije odnosno prisilnog rasterećenja elektroenergetskog sustava, mogao bi se riješiti problem povremenih nemogućnosti isporuke OIE u mrežu.



Slika 6. Porast udjela pojedinog izvora OIE na tržištu RH zaključno s krajem 2017.⁽⁸⁾

U navedenom slučaju razmatrana su tri scenarija skladištenja vodika u tipsko ležište, ovisno o količini raspoložive električne energije generirane putem stohastičkih OIE. Budući da je ukupna instalirana snaga vjetroelektrana činila oko 75% ukupnog instaliranog energetskog potencijala OIE Republike Hrvatske na kraju 2017.⁽⁸⁾, ulazni podaci za odabir scenarija i proračun zasnovani su na trenutnom i budućem (procijenjenom) potencijalu vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj. U Hrvatskoj su trenutno u funkciji 22 vjetroelektrane ukupne snage 576 MW, dok ukupno instalirana energija vjetra i sunca

na kraju 2017. iznosi 625 MW.⁽⁸⁾ Iz vjetroelektrana u 2017. godini isporučeno je u električnu mrežu 1204 GW, što iznosi oko 24% proizvedene električne energije od teoretski mogućih 5045 GW godišnje snage. Ukoliko bi se na dnevnoj bazi iz električne mreže uzimalo oko 5% instaliranog raspoloživog tehničkog kapaciteta vjetroelektrana, uzimajući u obzir i pretpostavku o rastu navedenih kapaciteta za 10 i 20 godina, za potrebe proračuna mogu se formirati tri scenarija.

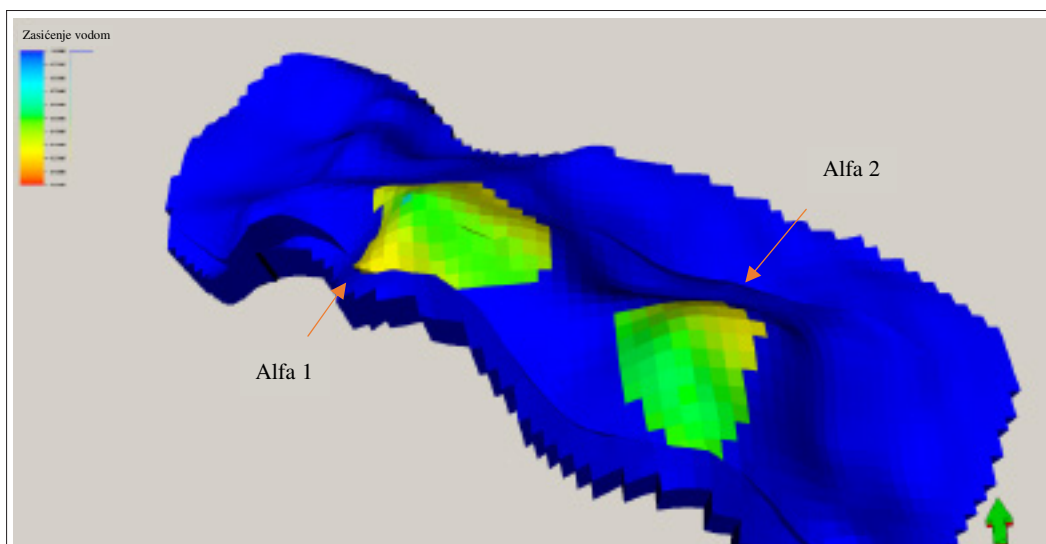
Slika 6. prikazuje porast udjela pojedinog izvora OIE na tržištu Republike Hrvatske zaključno s krajem

Tablica 1: Ulazni podaci za dimenzioniranje sustava elektrolizatora

Period	Predviđena instalirana snaga, MW (samo vjetroelektrane)	Ulazni podaci za proračun, MW (5% ukupne instalirane snage vjetroelektrana)
trenutno	576	28
za 10 godina	973	48
za 20 godina	1358	68

Tablica 2: Predviđeni scenariji proizvodnje vodika

Ulazni podaci za proračun, MW (5% ukupne instalirane snage vjetroelektrana)	Moguća satna proizvodnja vodika, kg/h (PEM elektrolizatori)	Volumni protok vodika, m ³ /h (približno)	Scenarij
28	560	7000	1.
48	980	11000	2.
68	1360	16000	3.



Slika 7. Prikaz strukture PSP Alfa s distribucijom početnog zasićenja vodom

2017., na osnovu koje je predviđen porast proizvodnje iz vjetroelektrane za 10 i 20 godina.

Ulazni podaci za dimenzioniranje sustava elektrolizatora, uz predviđeni porast instalirane snage vjetroelektrana za 10 i 20 godina, prikazan je u Tablici 1.

Moderni sustavi za proizvodnju vodika elektrolizom, zahtijevaju 50 do 70 kWh električne energije za proizvodnju 1kg pročišćenog vodika^(18,23). Sukladno podacima proizvođača opreme^(18,23), i raspoložive snage električne energije, predviđena su tri scenarija proizvodnje vodika prikazana Tablicom 2.

2.4. Proračun utiskivanja prirodnog plina i vodika u poroznu geološku formaciju – u podzemno skladište plina

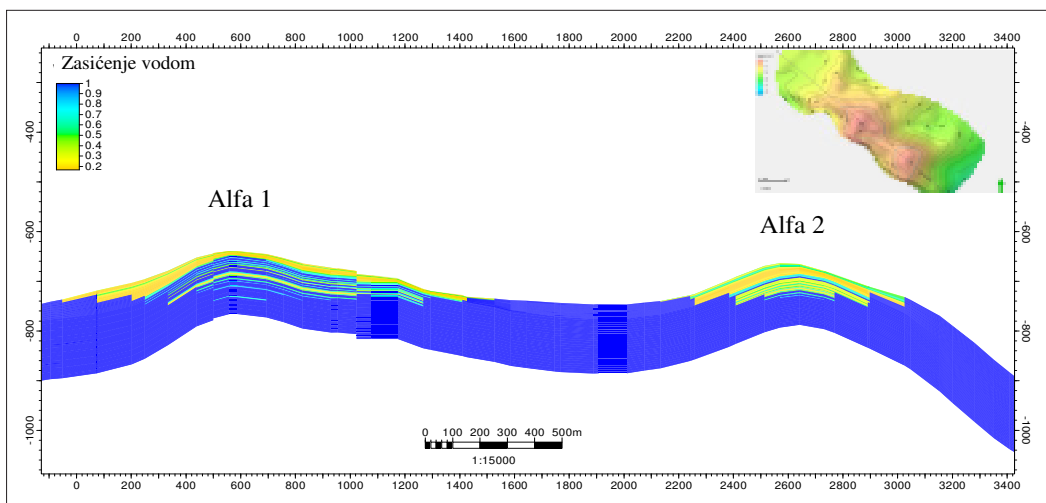
Za polugodišnje podzemno skladištenje prirodnog plina i u njemu umiješanog vodika odabrano je podzemno skladište plina Alfa (PSP Alfa), odnosno njegova odvojena ležišta Alfa 1 i Alfa 2. PSP Alfa

oblikovano je u zamci strukturno-stratigrafskog tipa. Sastoji od dva dijela, s dva tjemena, odvojena sedlom kao dubljim dijelom u vodenom zasićenju. Granice PSP Alfa određene su oblikom krovine, te granicom plina i vode u podini, Slika 7 i 8.

Ležišne stijene su metamorfiti podloge tercijara koji su kronostratigrafski neodređeni, te miocenske bioklastične vapnenačke naslage i konglomeratični pješčenjaci koje karakterizira dominantno prisustvo sekundarne poroznosti različitog porijekla i vrlo dobre propusnost. Pokrovne stijene su lapori. Debljina pokrovnih lapora iznad ležišta Alfa 1 je 68 m, dok je iznad ležištu Alfa 2 pokrovni lapor debljine 65 m.

PSP Alfa razrađeno je sa 16 povlačno-utisnih bušotina, od čega je 7 bušotina na području ležišta Alfa 1 i 9 bušotina na području ležišta Alfa 2. Zbog kontinuiranog i stabilnog dotoka proizvedenog vodika odabrano je skladištenje plina koje se odvija u godišnjim sezonskim ciklusima koji podrazumijevaju povlačenje plina tijekom zime od 1.10. do 31.3.

Slika 8. Geološki profil PSP Alfa (ležišta Alfa 1 i Alfa 2) s prikazom zasićenja vodom



Tablica 3: Osnovni tehnički podaci PSP Alfa

Osnovni tehnički podaci PSP Alaf		
Ležišta	Alfa 1	Alfa 2
Maksimalni ležišni tlak skladištenja, bar	100	
Minimalni ležišni tlak skladištenja, bar	55	
Ležišna temperatura, °C	65	
Apsolutna dubina težišta ležišta, m	-705	-716
Radni volumen plina, 10 ⁶ m ³	309	144
Plinski jastuk, 10 ⁶ m ³	370	177
Utvrđene rezerve plina, 10 ⁶ m ³	679	321
Broj radnih bušotina (povlačno-utisne)	7	9
Maksimalni skladišni povlačni i utisni kapacitet, 10 ⁶ m ³ /dnevno	2,5	
Ciklus povlačenje plina	od 1.10. do 31.3.	
Ciklus utiskivanja plina	od 1.4. do 30.9.	

i utiskivanje od 1.4. do 30.9. Maksimalni ležišni tlak skladištenja u oba ležišta je 100 bara, također u oba ležišta plin se povlači do tlaka u ležištima 55 bara. Ukupne utvrđene rezerve plina u ležištu Alfa 1 su 679 miliona m³, a u ležištu Alfa 2 su 321 milion m³. Shodno navedenom, radni volumen plina na PSP Alfa je 453 miliona m³, odnosno u ležištu Alfa 1 je 309 miliona m³ i u ležištu Alfa 2 je 144 miliona m³. Pregled osnovnih tehničkih podataka PSP Alfa dan je u Tablici 3.

Dominantan energetski režim u ležištima je volumetrijski (kompresija i ekspanzija uskladištenog plina i plinskog jastuka), odnosno utjecaj energije vodonosnika je vrlo mali te je u proračunima zanemaren. PSP Alfa je projektirano s maksimalnim utisnim i povlačnim radnim količinama 2,5 miliona m³/dnevno.

Sukladno formiranim scenarijima proizvodnje vodika kojeg je potrebno podzemno uskladištiti u

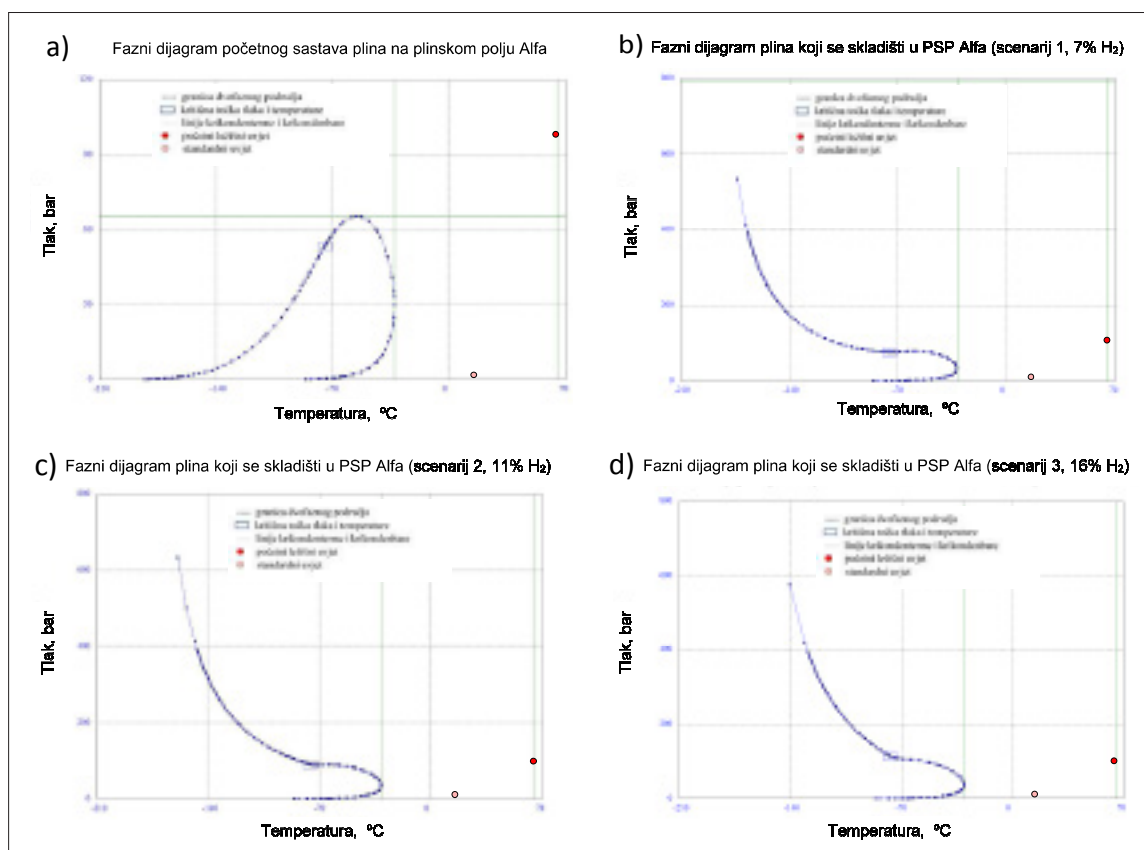
iscrpljena ležišta s originalnim prirodnim plinom počelo se je utiskivati prirodni plin s umiješanim molnim udjelom 7% vodika. Plin tog sastava utiskivan je u skladište u trajanju 2+10 godina. Potom se je nastavilo utiskivanje prirodnog plina s molnim udjelom vodika 11% u trajanju 10 godina te u konačnici zadnjih deset godina u PSP Alfa se je utiskivao prirodni plin s molnim udjelom vodika 16%. Tijekom modeliranja skladištenja umiješanog prirodnog plina i vodika na PSP Alfa za umješavanja plina u ležištima korištena je Peng i Robinsonova jednadžbe stanja za sastave plina navedene u Tablici 4.

Slika 9 prikazuje fazne dijagrame za sastave plina navedene u Tablici 4.

Prethodno početku skladištenja prirodnog plina i vodika skladište je pripremljeno na način da je u trajanju od dvije godine proizveden originalni plin iz ležišta do 10 bara dinamičkog tlaka na ušću radnih

Tablica 4: Sastav plina koji je korišten u proračunima: a) originalni plin u ležištima, b) prirodni plin sa 7% H₂, c) prirodni plin sa 11% H₂ i d) prirodni plin sa 16% H₂

a)	Naziv komponente	CO2	C1	C2	C3	IC4	NC4	IC5	NC5	C6	H2
	Molni udio, %	0,77	97,70	0,81	0,26	0,23	0,08	0,08	0,02	0,05	-
b)	Naziv komponente	CO2	C1	C2	C3	IC4	NC4	IC5	NC5	C6	H2
	Molni udio, %	0,77	90,72	0,80	0,25	0,23	0,08	0,08	0,02	0,05	7,00
c)	Naziv komponente	CO2	C1	C2	C3	IC4	NC4	IC5	NC5	C6	H2
	Molni udio, %	0,77	86,72	0,80	0,25	0,23	0,08	0,08	0,02	0,05	11,00
d)	Naziv komponente	CO2	C1	C2	C3	IC4	NC4	IC5	NC5	C6	H2
	Molni udio, %	0,76	81,75	0,79	0,25	0,23	0,08	0,08	0,02	0,05	16,00



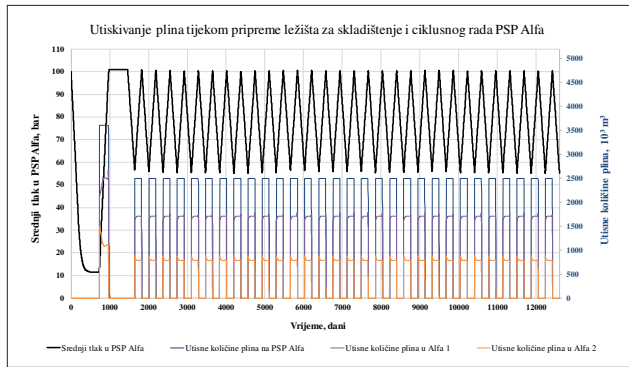
Slika 8. Fazni dijagram pina za: a) početni sastava plina, b) sastava plina sa 7% H₂, c) sastava plina sa 11% H₂ i d) sastav plina s 16% H₂

bušotina, te je potom u ležišta u trajanju 2 godine utiskivan prirodni plin s molnim udjelom vodika 7%. Nakon toga, kako je prethodno opisano, plin istog sastava je skladišten u trajanju 10 povlačno-utisnih ciklusa. Slika 9 i Slika 10 prikazuju parametre rada skladišta tijekom utiskivanja prirodnog plina s vodikom i rad skladišta tijekom povlačenja umiješanog plina iz PSP Alfa.

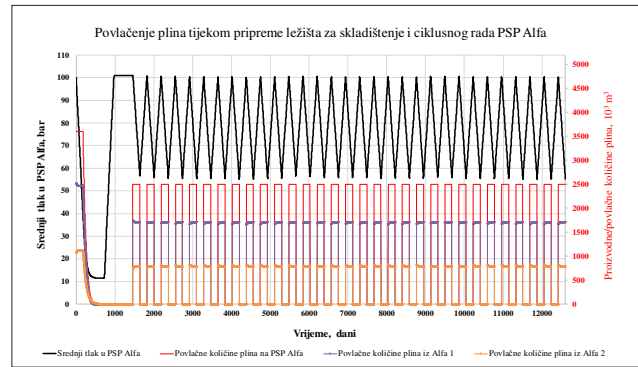
Na Slici 11 prikazano je povećanje molnog udjela vodika u sastavu ležišnog plina tijekom skladištenja u ležištima Alfa 1 i Alfa 2. Na prikazu se jasno vidi značajnije povećanje udjela vodika u ležištima nakon svakog povećanja molnog udjela vodika u plinu koji se utiskuje. Nakon nekoliko ciklusa koji slijede povećanju molnog udjela vodika u utiskivanom plinu molni udio vodika u ležištima se izjednačava s molnim udjelom vodika u utiskivanom plinu. S obzirom da su ležišta Alfa 1 i Alfa 2 modelirana analitičkim modelom izrađenom u MBAL stručnoj računalnoj aplikaciji (Petroleum Experts) i da se kod svakog utisnog ciklusa podrazumijeva volumetrijsko umješavanje utisnutog i ležišnog plina prikazani rezultat modeliranja je očekivan.

Propusnost u ležištima PSP Alfa je vrlo dobra i ležišta su razrađena s većim brojem bušotina koje su arealno locirane da aktiviraju u potpunosti sav plin u ležištima tijekom rada skladišta, također, povećanje udjela vodika u plinu povećava mu značajno mobilnost te se može smatrati **da je umješavanje približno volumetrijsko i da su rezultati modeliranja u ovom slučaju reprezentativni**. Za preciznije modeliranje ovih procesa u ležištima potrebno je koristiti 3D numerički model ležišta izgrađen na vjerodostojnom 3D geološkom modelu.

Tablica 5 i Slike 12 i 13 prikazuju promjene stanje inventara plina i promjenu stanja energetske bilance tijekom skladištenja prirodnog plina i vodika. Iz energetske bilance se vidi da je paralelno uz proces skladištenja prirodnog plina, ovisno o scenariju utiskivanja umiješanog prirodnog plina i vodika, moguće uskladištiti 90 – 205 GWh energije u kemijskom obliku. Kao što je predviđeno, povećanje udjela vodika u inventaru plina smanjuje energetska vrijednost uskladištenog plina. Razlog je manja energetska (ogrjevna) volumna vrijednosti vodika u odnosu na originalni ugljikovodlični plin. U slučaju da je skladište napunjeno samo



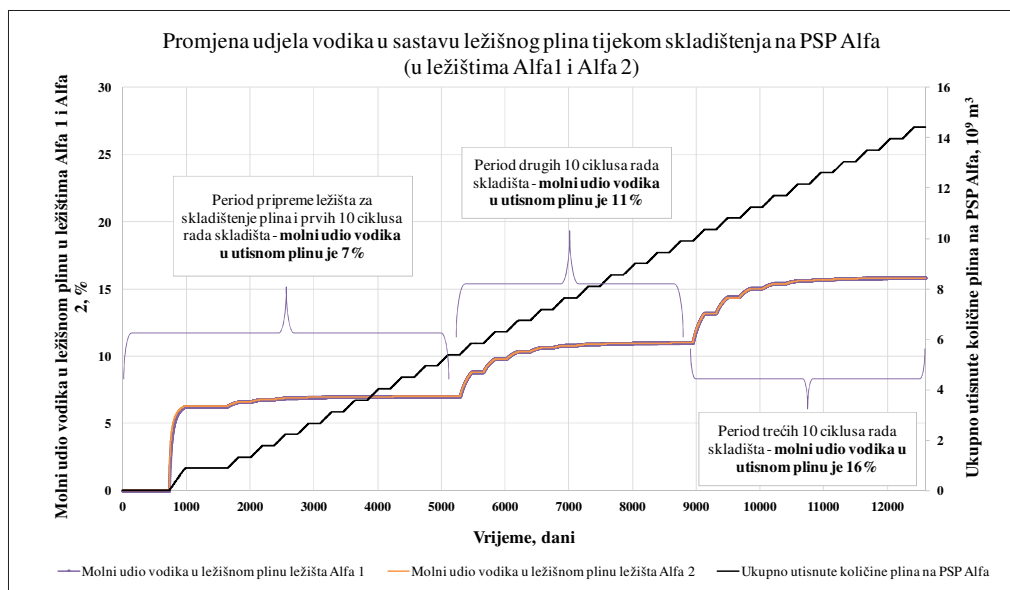
Slika 9. Dinamika tlaka u PSP Alfa i utisnih količina tijekom utiskivanja plina u ležišta Alfa 1 i Alfa 2



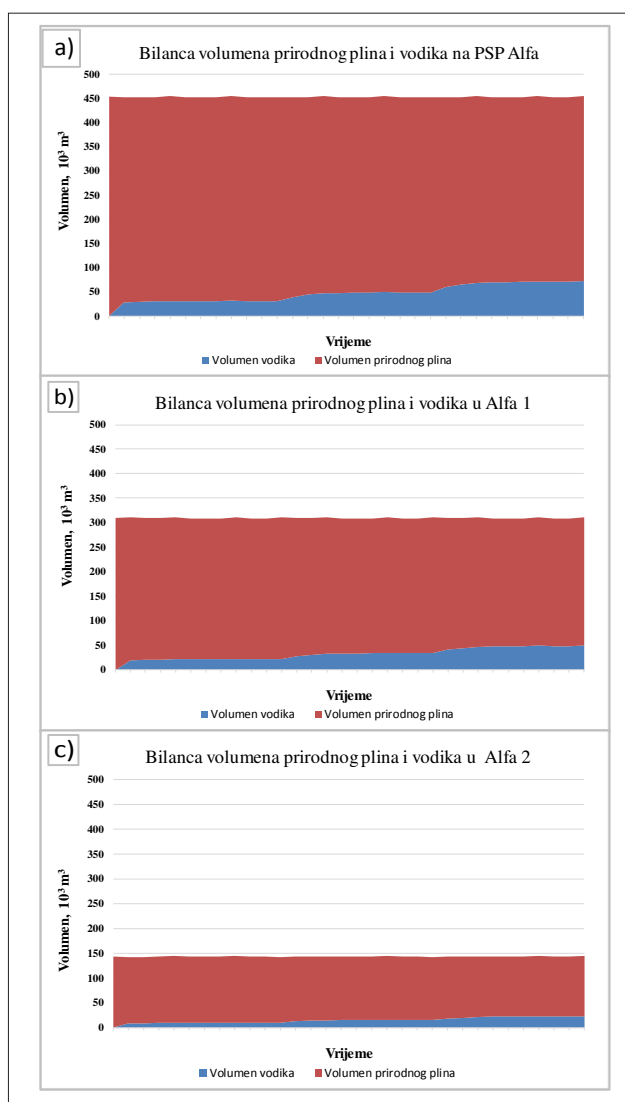
Slika 10. Dinamika tlaka i povlačnih količina tijekom povlačenja plina iz ležišta na PSP Alfa

Tablica 5: Tablični prikaz promjene stanja inventara prirodnog plina i vodika i promjene stanja energetske bilance u PSP Alfa (u ležištima Alfa 1 i Alfa 2)

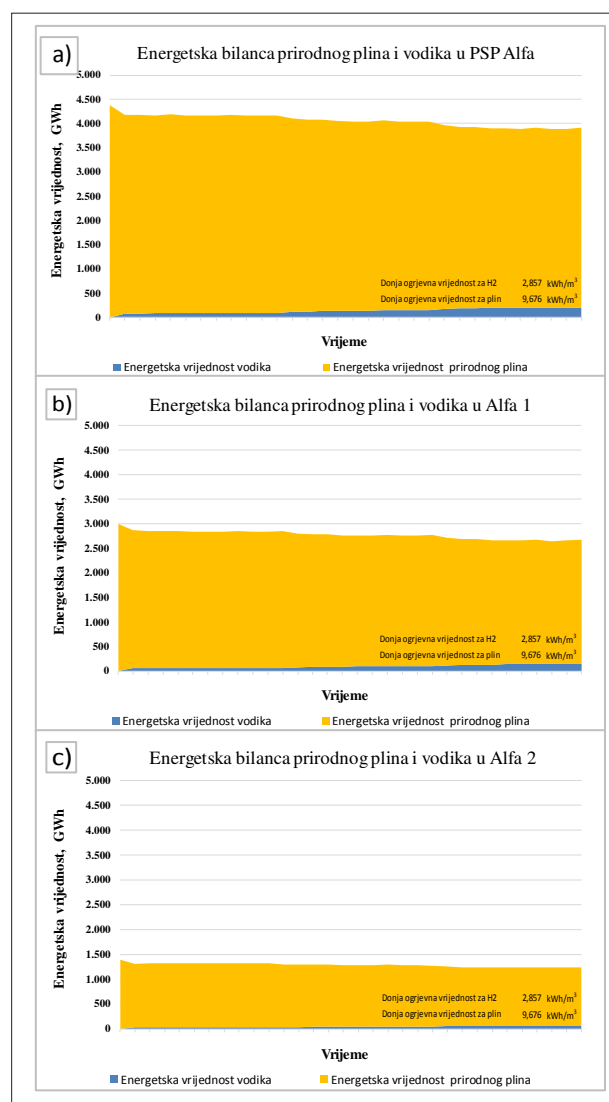
Vrijeme	Povlačni ciklus	Radni volumen	Volumen vodika	Volumen prirodnog plina	Energetska vrijednost vodika	Energetska vrijednost prirodnog plina	Energetska vrijednost radnog volumena
Dani	#	10^3 m^3	10^3 m^3	10^3 m^3	GWh	GWh	GWh
0	0	453,07	0,00	453,07	0,00	4.383,64	4.383,64
1.643	1	452,50	28,36	424,14	81,01	4.103,81	4.184,83
2.008	2	452,50	29,87	422,63	85,34	4.089,16	4.174,50
2.373	3	452,50	30,70	421,80	87,71	4.081,12	4.168,83
2.739	4	455,00	31,32	423,68	89,49	4.099,29	4.188,78
3.104	5	452,50	31,40	421,11	89,69	4.074,42	4.164,11
3.469	6	452,50	31,53	420,98	90,07	4.073,16	4.163,22
3.834	7	452,50	31,59	420,91	90,26	4.072,48	4.162,75
4.200	8	455,00	31,81	423,19	90,87	4.094,62	4.185,49
4.565	9	452,50	31,65	420,85	90,43	4.071,93	4.162,36
4.930	10	452,50	31,66	420,84	90,46	4.071,82	4.162,28
5.112	11	452,50	31,68	420,83	90,49	4.071,71	4.162,20
5.477	12	452,50	39,84	412,66	113,83	3.992,68	4.106,51
5.842	13	452,50	44,33	408,17	126,65	3.949,25	4.075,90
6.208	14	455,00	47,06	407,94	134,45	3.947,04	4.081,49
6.573	15	452,50	48,16	404,34	137,59	3.912,21	4.049,80
6.938	16	452,50	48,90	403,60	139,70	3.905,07	4.044,77
7.303	17	452,50	49,30	403,20	140,84	3.901,19	4.042,03
7.669	18	455,00	49,79	405,21	142,25	3.920,62	4.062,87
8.034	19	452,50	49,64	402,87	141,81	3.897,93	4.039,74
8.399	20	452,50	49,70	402,80	141,99	3.897,31	4.039,30
8.581	21	452,50	49,78	402,73	142,20	3.896,58	4.038,79
8.946	22	452,50	59,66	392,85	170,43	3.800,98	3.971,41
9.311	23	452,50	65,09	387,41	185,96	3.748,39	3.934,35
9.677	24	455,00	68,46	386,54	195,59	3.739,99	3.935,57
10.042	25	452,50	69,73	382,77	199,21	3.703,51	3.902,72
10.407	26	452,50	70,62	381,88	201,77	3.694,86	3.896,63
10.772	27	452,50	71,11	381,39	203,15	3.690,17	3.893,32
11.138	28	455,00	71,77	383,23	205,03	3.707,99	3.913,02
11.503	29	452,50	71,52	380,99	204,32	3.686,23	3.890,55
11.868	30	452,50	71,59	380,91	204,54	3.685,48	3.890,02
12.234	31	455,00	72,03	382,97	205,79	3.705,44	3.911,23



Slika 11. Promjene udjela vodika u sastavu ležišnog plina tijekom skladištenja na PSP Alfa



Slika 12. Grafički prikaz promjene stanja inventara prirodnog plina i vodika tijekom skladištenja plina: a) u PSP Alfa, b) u ležištu Alfa 1 i c) u ležištu Alfa 2



Slika 13. Grafički prikaz promjene stanja energetske bilance tijekom skladištenja plina: a) u PSP Alfa, b) u ležištu Alfa 1 i c) u ležištu Alfa 2

s vodikom (bez originalnog plina) u usporedbi kad je u skladištu samo originalni plin potrebno je volumen PSP Alfa povećati za oko 3,5 puta da bi bila uskladištena ista količina energije. No nažalost, kod sva tri modelirana scenarija skladištenja vodika, mješavina prirodnog plina i vodika koja se pridobiva ne zadovoljava sadašnju standardnu kvalitetu plina navedenu u Općim uvjetima opskrbe plinom (po sastavu, relativnoj gustoći i ogrjevnoj vrijednosti).

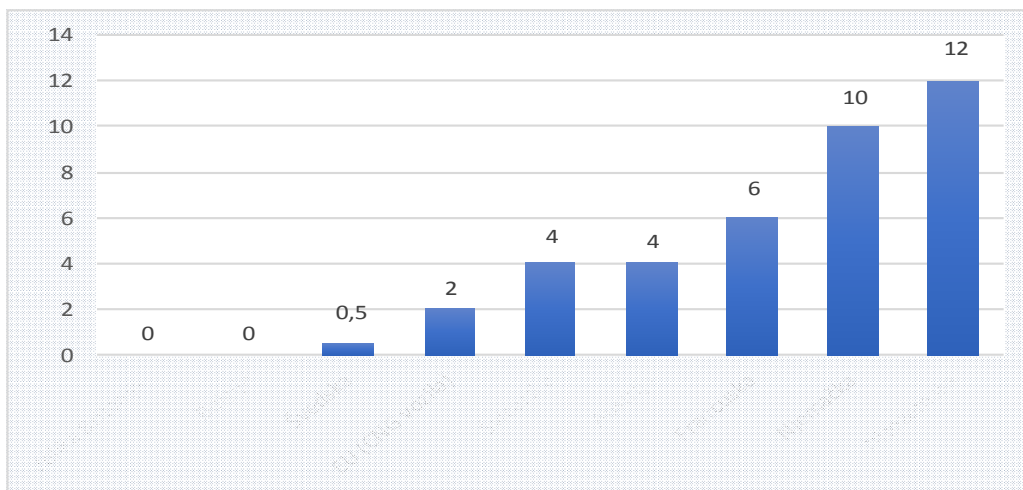
3. Regulatorni okvir i potrebne promjene

Danas ukupna količina radnog volumena podzemnih skladišta plina u EU iznosi 1130 TWh⁽¹¹⁾. Samo u posljednje dvije godine, ukupni opseg radnog volumena podzemnih skladišta plina se je smanjio za 4%⁽¹¹⁾. Ovakav negativni trend smanjenja podzemnih skladišta plina dovodi u pitanje i proces de-karbonizacije koji je jedan od primarnih temelja energetske politike EU. Smanjeni kapacitet podzemnih skladišta plina ima negativne međusektorske (plin/električna energija) učinke. Naime europsko udruženje za plinsku infrastrukturu: Gas Infrastrukture Europe - GIE je nedavno naručio istraživanje s ARTELYS-om, čiji su preliminarni rezultati predstavljeni na 32. Madridskom forumu⁽¹³⁾. Studija analizira sposobnost elektroenergetskog sustava da zadovolji potražnju uz smanjenje skladišnih kapaciteta plina na razini EU. To je omogućilo da se prvi put procijeni vrijednost skladišnih kapaciteta europskih skladišta plina. U ovoj analizi, a na temelju pretpostavki zajedničkih scenarija s European Network Transmission System Operators - ENTSO, došlo se do zaključka da u 2030. godini, dodatni operativni troškovi za proizvodnju i distribuciju električne

energije postaju veći za jednu milijardu eura godišnje a proizlaze iz oko 10% smanjenja skladišnih kapaciteta za plin⁽¹¹⁾.

Obzirom na nužnu promjenu regulatornog okvira što se tiče sektora plina i električne energije, mišljenje je autora ovog rada da nisu potrebne veće nadogradnje što se tiče administrativno-pravnih uvjeta koje bi energetske subjekti trebali ispunjavati. Veće promjene regulatornog opsega bile bi potrebne što se tiče samog nadzora nad poslovanjem energetskih subjekata. Postojeći pravni i regulatorni okvir uspostavljen je bez razmatranja novih tehnologija, primjerice (Power to Gas-tehnologija) kao i korištenja sve većeg udjela vodika u mješavini s prirodnim plinom. Stoga je potrebno prilagoditi trenutni okvir kako bi se omogućilo povećanje udjela obnovljive energije u plinskom sektoru te postupno uskladila mrežna planiranja za plin i električnu energiju.

Agencija za Suradnju Energetskih Regulatora, (dalje u tekstu: ACER) kao europsko tijelo za koordinaciju aktivnosti nadzora regulatora država članica EU trebala bi imati aktivnu ulogu u potrebnoj koheziji dvaju regulatornih sektora: električne energije i plina⁽¹⁵⁾. Ekonomska učinkovitost odnosno zakon tržišta najbolje bi trebao služiti kao čimbenik nove kohezije sektora ali biti će potrebno i osigurati određene minimalne uvjete da se uspostavi odgovarajuće regulirano stanje koje bi osiguralo određenu potrebnu razinu ravnopravnosti u novoj sektorskoj koheziji. Naime, kod usklađivanja samih sektora za plin i električnu energiju potrebno je istaknuti i nesukladnost unutar samog plinskog sektora a koji sam po sebi predstavlja izazov između samih država članica EU odnosno koji unutar samog sektora predstavlja određenu prepreku u skladištenju vodika u podzemnim skladištima plina odnosno način tretiranja vodika



Slika 14. Prikaz maksimalne razine miješanja vodika u transportnoj mreži prirodnog plina u određenim zemljama EU u postocima
Izvor: autorova obrada podataka, Natural Gas World

unutar same plinske mreže EU. Naime, dozvoljena koncentracija vodika u plinskoj mreži EU znatno se razlikuje između država članica (između 0,1 vol.% do 10 vol.%)⁽¹⁷⁾. Isto tako postoje države članice EU u kojima ubrizgavanje vodika u plinsku mrežu općenito nije niti dopušteno.

Na slici 14 prikazane su iznosi maksimalne razine miješanja vodika u plinskoj transportnoj mreži u nekim zemalja EU u postocima.

Prethodno navedena neusklađenost regulative unutar samog plinskog sektora EU, postavlja prvi potrebni stupanj kohezije na području regulative unutar plinskog sektora kako isti ne bi doveo u pitanje daljnji razvoj/koheziju tržišta električne energije i plina. Iako će ACER kao čimbenik regulatorne kohezije na razini EU morati biti načelni pokretač predmetne inicijative, najveći izazovi biti će postavljeni prema samim regulatorima država članica koji će uključujući i Republiku Hrvatsku, morati (imajući u vidu prilagodbu regulatornog okvira), izvršiti detaljnu analizu svojih energetske ciljeva te postupno prilagođavati buduću regulativu samim mogućnostima infrastrukture i stupnju razvoja energetske tržišta. Republika Hrvatska će kao država članica EU uz nužnu promjenu regulatornog okvira morati vršiti daljnja ulaganja u podzemna skladišta plina te ubrzati svoje napore u daljnju izgradnju plinske mreže a sve kako bi bila spremna postati infrastrukturno čvorište novog energetske doba u kojem je sve izglednije da će vodik imati prevladavajuću ulogu u plinskoj infrastrukturi Europe.

4. Zaključak

Intermitentna priroda većine obnovljivih izvora energije predstavlja poteškoće pri usklađivanju dobave i potražnje te uzrokuje tehničke probleme vezane uz vođenje elektroenergetske mreže te generira trošak kod usklađivanja rada elektroenergetske sustava. Skladištenje energije može imati ključnu ulogu u rješavanju ovih problema, jer omogućava povećanje stabilnosti mrežnog sustava izloženog visokoj penetraciji intermitentnih OIE.

Rezultati modeliranja skladištenja vodika u PSP Alfa pokazuje da je paralelno uz proces skladištenja prirodnog plina moguće uskladištiti 90 – 205 GWh energije u kemijskom obliku. S obzirom na manju energetske vrijednost vodika (po jedinici volumena) u odnosu na prirodni plin, povećanjem udjela vodika u inventaru plina smanjuje se energetske vrijednost inventara. U slučaju da se na PSP Alfa skladišti samo

vodik, potrebno je proširenje skladišta za oko 3,5 puta da bi se skladištila ista količina energije. Navedeno ukazuje na potrebnu dogradnje postojećih skladišnih kapaciteta u slučaju da u budućnosti vodik potpuno zamjeni prirodni plin. Kod svih scenarija skladištenja vodika, mješavina prirodnog plina i vodika koja se povlači ne zadovoljava sadašnju standardnu kvalitetu plina navedenu u Općim uvjetima opskrbe plinom u Republici Hrvatskoj.

Navedeni izazovi proizvodnje i skladištenja vodika prema mišljenju autora ne trebaju djelovati obeshrabrujuće, naprotiv, oni trebaju već sad biti poticaj za smišljeno planiranje potrebnih radnji za prelazak na nove energente. Ti izazovi su dobrim dijelom pod utjecajem činjenice da trenutno ne-postoji zakonodavni okvir koji bi uspješno riješio integraciju OIE i sustava skladištenja i transporta prirodnog plina. Postoje važne tehničke, ekonomske i naravno geostrateško-energetske političke prepreke (primjerice, pokušaji de-karbonizacije plina miješanjem s vodikom predstavlja rizik za sadašnje ugovore o opskrbi plinom, u kojima se navodi bruto kalorična vrijednost, dopušteni rasponi nečistoća, „klauzula o kvaliteti prirodnog plina“ može čak i dovesti do novčanih kazni od kupaca kao i dovesti do toga da operatori transportnog sustava odbace dio ili cijeli plin), stoga će uklanjanje tih pravnih i tehničkih prepreka također zahtijevati značajan stupanj prekogranične suradnje, a kako bi se postigao cilj maksimalnog iskorištavanja raspoloživog potencijala obnovljivih izvora energije. Zaključno, autori smatraju da bi bilo učinkovito a sukladno navedenom razmišljati i o uvođenju sustava poticaja za skladištenje energije, koji bi mogao biti interesantan svim sudionicima razvoja elektroenergetske sustava a nedvojbeno bi omogućio veću integraciju i penetraciju OIE u postojeći elektroenergetski sustav.

Konstantan napredak tehničko tehnoloških rješenja vezanih za skladištenje energije, približava marginu ostvarenja ekonomske isplativosti navedenih projekata. U tu svrhu potrebno je intenzivno istraživati i razvijati rješenja za skladištenje energije u svrhu postizanja zadanih ciljeva definiranih Pariškim sporazumom.

U tom kontekstu autori smatraju da je potrebno puno više uložiti financijskih sredstava na istraživanje i razvoj kako bi se razvile nove tehnologije potrebne za borbu protiv klimatskih promjena pri čemu glavna odgovornost za energetske ulaganja počiva na vladama i njihovim odlukama usmjerenim na održivost energetske sustava (globalna ulaganja u energetiku u 2018. godine kretala su se oko 1,85 bilijun dolara)⁽¹²⁾.

Literatura

1. ASSAF, J.; SHABANI, B.: Transient simulation modelling and energy of a standalone solar-hydrogen combined heat and power system integrated with solar-thermal collectors. *Appl. Energy* 2016, 178, 66–77.
2. ASSAF, J.; SHABANI, B.: Experimental study of a novel hybrid solar-thermal/PV-hydrogen system: Towards 100% renewable heat and power supply to standalone applications. *Energy* 2018, 157, 862–876.
3. BULATOV, G.G., 1979. Underground storage of hydrogen (Ph.D. thesis). Moscow Gubkin Oil and Gas University
4. BUZEK, F., ONDERKA, V., VANCURA, P., WOLF, I., 1994. Carbon isotope study of methane production in a town gas storage reservoir. *Fuel* 73 (5), 747–752.
5. CARDEN, P.O., PATERSON, L., 1979. Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage. *Int. J. Hydrog. Energy* 4 (6), 559–569.
6. EC, „Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)“, Brussels 2016.
7. FOH, S., NOVIL, M., ROCKAR, P., RANDOLPH, P., 1979. Underground hydrogen storage. Final report, Institute of Gas Technology, Chicago, 268 pp.
8. GRANIĆ, G. ET AL, Analize i podloge za izradu energetske strategije Republike Hrvatske, ZELENA KNJIGA – NACRT, EIHP, Zagreb 2018.
9. GUPTA, R., BASILE, A., VEZIROĞLU, T.; Compendium of hydrogen energy. Vol. 2, Hydrogen storage, distribution and infrastructure, Woodhead Publishing Series, 2015.
10. IRENA (2018), Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
11. Pavlović, D., Bolanča, A., Šijanović Pavlović, S. (2018.): *Internet of Things i Blockchain kao temelj sigurnosti energetske sustava s visokim udjelom intermitentnih izvora*, 11th International Scientific and Professional Conference „Crisis Management Days 2018“, Zbornik radova 393-409, Brijuni, Croatia, May 23-24, 2018.
12. Izvješće World Energy Investment (WEI) o investicijama ostvarenim u 2018. godini.

Internetske stranice

- <https://www.gie.eu>
- <https://www.artelys.com/>
- <https://ec.europa.eu>
- <https://www.gasunie.de>
- <https://www.acer.europa.eu>
- <https://www.hylaw.eu>
- <https://hydrogeneurope.eu>
- <https://www.siemens.com>
- <https://cordis.europa.eu › project › rcn › reporting>
- <https://www.underground-sun-storage.at>
- https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/quarterly_report_on_european_electricity_markets_q3_2018.pdf
- <https://www.engie.com/en/businesses/gas/hydrogen/hydrogen/>

Izjava o ograničenju odgovornosti:

Ocjene i stavovi izneseni u radu, predstavljaju isključivo osobna stajališta autora i nisu ni na koji način obavezujući niti se mogu protumačiti kao službeno stajalište institucija u kojima su autori zaposleni.